干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

doi:10.13866/j.azr.2019.01.10

干涸盐湖地下水和土壤化学属性对自然植被分布的控制作用①

程国帅， 刘东伟， 温 璐， 刘华民， 董少刚， 王立新
（内蒙古大学生态与环境学院，内蒙古 呼和浩特 010021）

摘 要： 我国西北地区湖泊萎缩、干涸，大面积裸露湖床成为化学粉尘的释放源。湖床植被能有效抑制粉尘排放，提高干涸湖床植被覆盖度成为生态治理的重要举措之一。本研究以内蒙古北部边缘典型现代干涸盐湖——巴拉嘎斯湖为研究区，通过野外调查，样带选择，实地采样分析和实验室统计分析，研究了干涸湖床地下水及土壤化学属性对湖区自然植被分布的控制作用。结果表明：在地下水和土壤化学属性影响下，湖区植被从干涸湖床至湖滨依次呈现芦苇群落、盐爪爪群落、芨芨草群落、红砂群落和小针茅群落的环状分布。湖区自然植被分布主要受地下水水位、地下水总溶解性固体（TDS）与土壤有效磷含量的控制。地下水埋深由湖床至湖滨逐渐增加，地下水 TDS 逐渐减小，当地下水埋深为 4 m 左右且 TDS 较低（$<10\ g \cdot L^{-1}$）时，植被群落呈现最大生物量及最大覆盖度。土壤有效磷对植被分布影响最大，其次是土壤中 SO_4^{2-}。当土壤含盐量能满足原生自然植被正常生存的条件时，地下水与土壤有效磷含量应是人工恢复植被优先考虑的因素。

关键词： 盐湖；干涸湖床；地下水；荒漠植被；土壤化学；内蒙古

近几十年，在气候变化和人类活动双重影响下，我国西北地区的湖泊迅速萎缩减少，甚至完全干涸[1-2]。湖水退缩后，大面积干涸湖床裸露，浅层地下水蒸发，盐分表聚，使得湖滨土壤高度盐碱化。干涸湖床表层盐分被风侵蚀，形成盐碱尘暴，对周边生态与环境造成严重危害[3]。国内外研究表明，干旱区的干盐湖对 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 具有巨大的释放潜能，这些细致的颗粒物具有更大的比表面积，更易吸附重金属，且能以化学气溶胶的形式长期悬浮于大气中，易于被长距离运输，进而影响全球气候及人类健康[4-6]。干涸湖床盐碱粉尘的排放量与植被覆盖度相关，地表植被覆盖可以保护土壤并改变表面粗糙度，显著抑制粉尘排放[7-9]。国内部分学者提出通过植被的自然演替，增加干涸裸露湖床植被覆盖度，可以有效防止风蚀、抑制大气颗粒物的排放，防止干涸湖床成为大气颗粒物排放源[10-11]。但是自然演替往往是一个长期的过程，短期内很难达到理想的效果。因此，研究自然植被发育、分布及其与地下水—土壤化学等的相互关系，为开展人工建植本地植物，快速提升干涸湖床植被覆盖度，抑制干涸盐湖粉尘释放具有重要意义。

传统的生态学理论认为，生物与其生存环境是一个不可分割的整体，它们息息相关，相互制约，相互联系，有规律的组合在一起，并处于不断的动态变化中。生态因子对物种的生长发育、分布起着直接或间接的作用，植物通过个体、种群及群落结构的变化特征来响应周围的生境[12-13]。对植物种群空间分布及其主导因子的探讨，对于指导人工修复干涸湖床，选取优良植物物种具有重要的参考价值[14]。在干旱半干旱地区，植被的群落组成和物种分布都与地下水具有显著的相关性，地下水的任何变化都可能会影响当地的生态系统[15]，不同植被类型的地下水埋深具有显著差异[16]。土壤化学属性对植被覆盖度、物种丰富度等属性也有重要影响[17]。Fan 等[15]利用除趋势典范对应分析（DCCA）表明，影响植物物种分布的两大环境因子为地下水埋深和土壤含盐量。Sun 等[17]研究表明，导致准噶尔盆地梭梭（*Haloxylon ammodendron*）退化的主要因素是地下水位的下降、地下水 TDS 的增加与土壤盐碱化。地下水是植被生存的重要水源，也是群落特征的主要驱

① 收稿日期：2018-04-17； 修订日期：2018-08-10
基金项目：国家自然科学基金项目（41571090，31560146，41562020）；内蒙古自治区自然基金项目（2017MS0404）资助
作者简介：程国帅（1992-），男，在读硕士研究生，研究方向为湖泊湿地生态恢复. E-mail：jghygzs@163.com
通讯作者：刘东伟. E-mail：liudw@imu.edu.cn

动力，土壤在调节植物生长所需养分等方面发挥着重要作用，地下水埋深适宜时，植被覆盖度受土壤化学性质（如有效磷、电导率）影响显著，而当地下水埋深增加到一定值后，随着地下水埋深增加，植被覆盖度、地上生物量等明显降低[18]。地下水埋深过浅，土壤含盐量高也对植被覆盖度有负面影响，Kobryn 等[19]通过深水渠排水的手段，降低了地下水位，而相应的植被覆盖度明显提高。马玉蕾等[20]对黄河三角洲典型植被与地下水和土壤含盐量的关系研究表明，不同物种对地下水埋深和土壤含盐量有着不同的适宜阈值。但迄今为止，国内外对于地下水和土壤化学属性对植被分布影响的研究多集中于河流河岸等地，对干涸盐湖地下水和土壤化学属性如何控制植被分布的研究甚少，郝清华[21]评价了吉兰泰盐湖不同方式下植被恢复效果，造林区的植被多样性指数和丰度指数最高，张莹莹[22]研究了运城盐湖盐角草（*Salicornia europaea*）生物学特征的影响因子发现，Na^+ 和 Cl^- 影响最大，而盐角草对 Na^+ 和 Cl^- 也具有较强的吸附能力，有利于改良土壤。干涸盐湖地下水和土壤化学属性如何控制植被分布的机理尚不明确。为此，本研究从提升裸露湖床植被覆盖度的角度出发，以湖区原生自然植被为研究对象，探究控制不同物种生长分布的地下水和土壤化学属性，在适合本地植物生存的地下水—土壤环境条件下人工恢复本地植物，利用本地植物阻滞湖周边风蚀颗粒大范围进入裸露的干涸湖床，从而抑制干湖床盐碱粉尘的释放。

1 研究区概况

本研究以完全干涸的巴拉嘎斯湖（112.42° ~ 112.45°E，43.62° ~ 43.68°N）为研究区，该湖地处内蒙古北部中蒙边境，西临二连浩特市，北接苏尼特左旗，南连苏尼特右旗，隶属于锡林郭勒盟（图 1）。东西宽约 1.2 km，南北长约 5 km，总面积约 6.3 km^2。该区域属于温带大陆性气候区，温带草原气候与温带沙漠气候交界处，干燥少雨，年均降水量为 133.9 mm 左右，年均气温在 6.4 ℃左右。湖床沉积物盐分表聚现象明显，湖床高度盐碱化，地下水埋深较浅且呈碱性，从完全裸露的干涸湖床到湖滨草原，

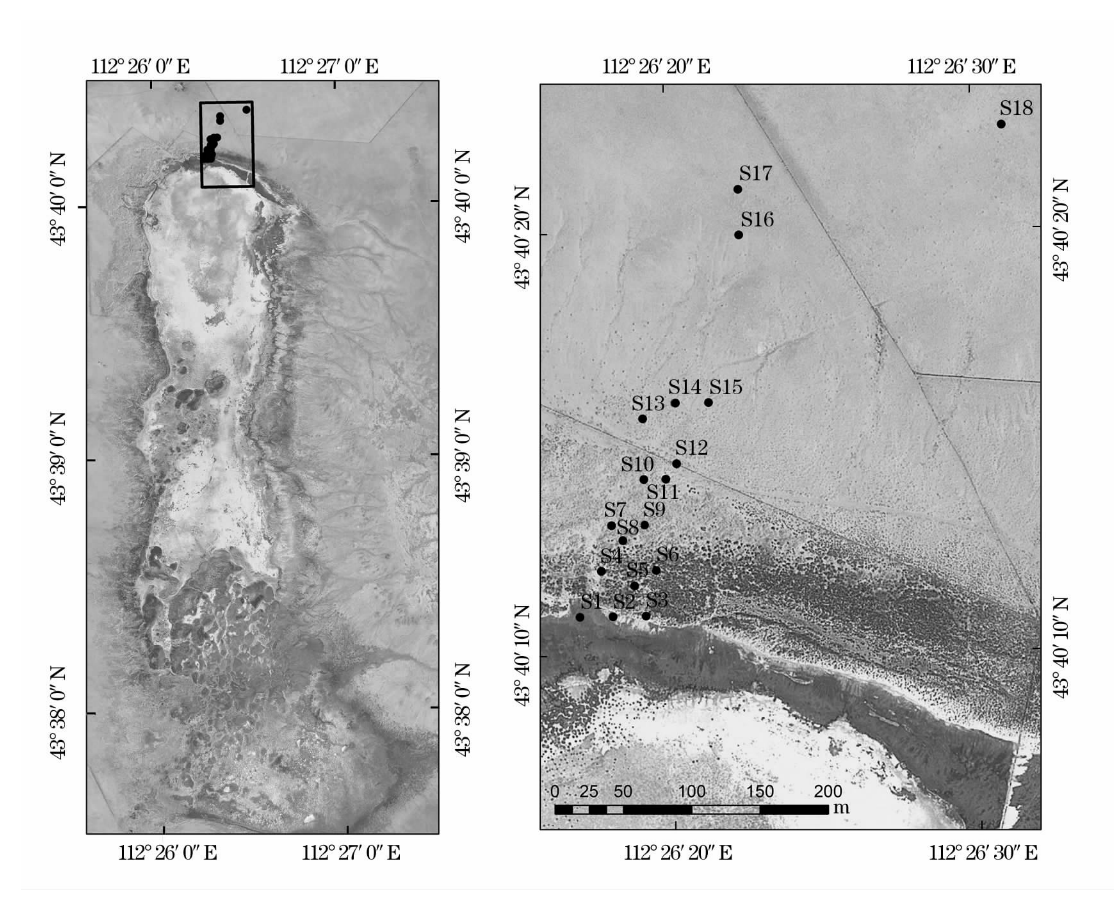


图 1 研究区及采样点分布示意图

Fig. 1 The study area and distribution of sampling sites

其植被群落演替空间异质性显著,是典型的现代干涸盐湖。

2 材料与方法

2.1 野外数据采集

从完全裸露的干涸湖床到湖滨草原,基于地形起伏(922 ~ 941 m)及植被群落变化选择样带。植被调查采用样方(3 次重复)如图 1 所示。采样时间为 2017 年 7 月。灌木植被样方大小为 5 m × 5 m,草本为 1 m × 1 m,记录植被物种类型及物种数、建群种、植被覆盖度、灌木植物的冠幅与株高、草本植被的株高、株数等属性,并采集草本植株带回测量地上生物量。在湖床裸地及植被样方内使用 T 型土钻,采集土壤样品共 63 个,各 3 层(0 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm 和 40 ~ 60 cm)。在土壤样品采样点相同位置继续采集地下水样品(< 4 m),使用多参数水质测定仪测量地下水总溶解性固体(total dissolved solids,TDS)并记录地下水水位。

2.2 样品处理与数据分析

2.2.1 地上生物量 灌木植株的收割采集不仅费工费时,而且破坏生态系统,而灌木地上生物量模型是估测灌木生物量行之有效的方法。

$$W = a(CH)^b \tag{1}$$

式中:W 为灌木植株地上生物量;C 为灌木植株冠幅长径与短径的乘积;H 为灌木植株的株高;a、b 为参数系数,本研究中盐爪爪 a 取值为 0.003,b 取值为 0.971;红砂 a 取值为 0.013,b 取值为 0.757[23]。草本采用烘干法称量样品干重,即为生物量。

2.2.2 土壤样品 本研究着眼于土壤化学性质对植被的影响,化学性质测量包括水溶性盐离子(CO_3^{2-}/HCO_3^-,SO_4^{2-},Cl^-,Ca^{2+},Mg^{2+},K^+,Na^+)含量、总含盐量、pH 值、有效磷,各指标测试工作由新疆农业大学草业与环境学院完成,其中全含盐量测定方法为烘干重量法,水溶性阳离子含量为原子吸收法,CO_3^{2-}/HCO_3^- 为滴定法,有效磷为碳酸氢钠浸提－钼锑抗比色法,pH 为酸度计法[24],Cl^- 和 SO_4^{2-} 为离子色谱法[25]。为探究植被抑制粉尘释放作用,需测量土壤粒径分布,在内蒙古大学环境检测中心采用激光粒度仪 S3500 分析测量,粒度测量范围为 0.021 5 ~ 2 000 μm。

本研究运用的统计方法主要有单因素方差分析、主成分分析、冗余分析等。单因素方差分析用以统计每个群落建群种植物属性及其之间的显著性差异,主成分分析用以研究地下水埋深、TDS 及土壤化学性质对植被分布的控制力大小,采用冗余分析(RDA)研究土壤各化学因子含量对植物生长发育

表 1 植被群落属性特征

Tab. 1 Attributive characters of the vegetation communities

与干涸湖床距离/m	采样点	建群种	覆盖度/% (mean ± SE)	生物量/(g · m^{-2}) (mean ± SE)	株高/m (mean ± SE)
3	S1 ~ S3	芦苇(*Phragmites australis*)	30.00 ± 5.77a	57.42 ± 8.14c	22.00 ± 3.51bc
20	S4 ~ S6	盐爪爪(*Kalidium foliatum*)	57.00 ± 11.93a	484.39 ± 131.83a	30.00 ± 3.78b
35	S7 ~ S9	盐爪爪	60.33 ± 10.33a	428.32 ± 37.82a	26.33 ± 2.18b
85	S10 ~ S12	芨芨草(*Achnatherum splendens*)	53.33 ± 6.67a	123.98 ± 22.17b	46.33 ± 6.01a
140	S13 ~ S15	红砂(*Reaumuria songarica*)	26.82 ± 2.46a	36.94 ± 3.10cd	13.00 ± 0.58cd
300	S16 ~ S18	小针茅(*Stipa klemenzii*)	33.33 ± 2.72a	21.52 ± 3.08d	7.67 ± 0.67d

注:不同字母表示不同种群间有显著差异(P < 0.05);S4 ~ S6:盐爪爪群落(无芦苇),S7 ~ S9:盐爪爪－芦苇混合群落(有大量芦苇)。

表 2 植被群落物种

Tab. 2 Vegetation species

采样点	建群种	其他植被	物种数
S1 ~ S3	芦苇	－	1
S4 ~ S6	盐爪爪	白刺(*Nitraria tangutorum*)、珍珠(*Salsola passerina*)	3
S7 ~ S9	盐爪爪	白刺、芦苇	3
S10 ~ S12	芨芨草	蛛丝蓬(*Halogeton arachnoideus*)、猪毛菜(*Salsola collina*)、沙葱(*Allium mongolicum*)、雾冰藜(*Bassia dasyphylla*)	5
S13 ~ S15	红砂	阿氏旋花(*Convolvulus ammannii*)、沙薹草(*Carex bohemica*)、无芒隐子草(*Cleistogenes songorica*)、小针茅、蛛丝蓬、猪毛菜、沙葱、雾冰藜	9
S16 ~ S18	小针茅	蛛丝蓬、沙葱、阿氏旋花、沙薹草、无芒隐子草	6

的影响，并评价其影响力大小。绘制走势图以评估植物属性与地下水埋深、土壤化学因子间的相互关系。本研究所有数据统计分析利用 IBM SPSS Statistics 20.0 软件完成，RDA 由 CANCOO 4.5 软件实现，图形绘制使用 Origin 2017 软件完成。

3 结果与分析

3.1 植被群落特征

表 1 ~ 2 表明，从完全裸露的干涸湖床到湖滨草原，植被群落分布的异质性明显，由干涸湖床向外，湖滨带植被群落依次是芦苇群落、盐爪爪群落、芨芨草群落、红砂群落、小针茅群落，共有 5 种建群种，14 种植物种。覆盖度呈先增后减的变化趋势，盐爪爪群落处呈现最大值，平均覆盖度介于 57.00% ~ 60.33%，草本层则是芨芨草群落，覆盖度为 53.33%；植被地上生物量和株高具有相同的变化趋势，盐爪爪与芨芨草的地上生物量分别为 484.39 $g \cdot m^{-2}$ 与 123.98 $g \cdot m^{-2}$，株高分别为 30.00 m 与 46.33 m。

3.2 地下水、土壤化学性质与植被分布关系

巴拉嘎斯湖地下水和土壤化学属性与自然植被分布关系见图 2 和图 3。从湖床裸地起，以植被群落采样点为横坐标点绘制地下水埋深、TDS 及各层土壤化学参数变化曲线。

地下水埋深由湖床向外逐渐增加，地下水 TDS 逐渐减小，地下水埋深为 4 m 左右且 TDS 较低（7.7 $g \cdot L^{-1}$）时，植被群落呈现最大生物量和覆盖度（数据见表 1）。土壤呈碱性 - 强碱性（7.8 < pH < 8.8）。由干涸湖床向外为水平方向，土层由上至下为垂直方向，各层土壤中化学要素含量水平方向变化趋势均相近，总含盐量水平方向呈下降趋势，且裸地处含盐量（ >10 $g \cdot kg^{-1}$）明显高于植被群落（ <7 $g \cdot kg^{-1}$），垂直方向除裸地 40 ~ 60 cm 含量相对上层有所减少，其余各采样点垂直方向含量变化可忽略。

盐基离子 Cl^-、Ca^{2+}、K^+ 变化趋势与总含盐量相似；CO_3^{2-}/HCO_3^- 水平、垂直方向变化均无规律，Na^+、Mg^{2+} 变化甚少；SO_4^{2-} 水平方向呈先增后减，盐爪爪群落处含量最高，垂直方向越深层含量越高。有效磷含量水平方向呈先增后减，与植被覆盖度和生物量变化趋势相似，即与群落演替等级相关，等级越高的群落所需营养物质含量越高，垂直方向则呈

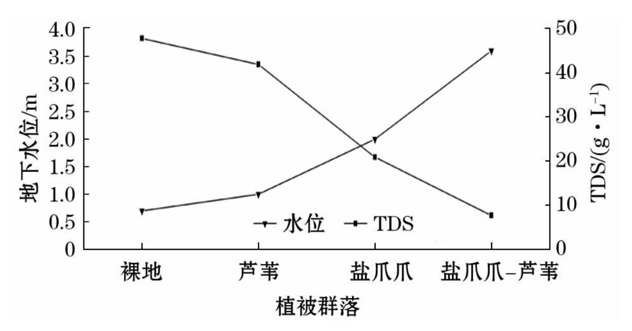


图 2 地下水与自然植被的关系

Fig. 2 Relationship between groundwater level and natural vegetation

下降趋势。

3.3 环境因子对植被分布的控制作用

地下水水位、TDS 及土壤类化学性质，均对自然植被的生长发育、分布有影响，但各因子所产生的影响力不同，因此，欲探究环境因子对植被的具体作用，需对其排序以提取主要影响因子。

3.3.1 地下水埋深、TDS 及土壤化学性质对植被分布的制约 对地下水水位、地下水 TDS 及土壤主要化学性质（总含盐量、有效磷、pH）进行主成分分析，根据特征值大于 1 的原则，提取主成分及其特征值、贡献率（表 3）。

由表 3 可知，0 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm 土层土壤化学性质与地下水主成分累积贡献率在 85% 以上，能够很好地反应各个指标大部分信息，40 ~ 60 cm 土层土壤化学性质与地下水主成分累积贡献率接近 70%，也基本包含了以上指标的大部分信息，其中第一主成分具有最大贡献率。表中各因子负荷量大小反映了该指标贡献的大小，地下水水位、地下水 TDS 分别与土壤主要化学性质进行分析，地下水的水位与 TDS 含量均具有最大的负荷量与贡献率，为第一主成分。因此，地下水环境条件为影响植被分布和生长发育的首要因子。

3.3.2 土壤化学特征对植被的影响 自然植被除受地下水影响外，土壤也是植被密不可分的环境因子，而区分土壤中各化学要素影响力大小对探究土壤环境因子对植被分布控制力大小也具有重要意义，因此，需对土壤总含盐量（TS）、有效磷（A-P）、pH 及水溶性离子 CO_3^{2-}/HCO_3^-（C）、SO_4^{2-}（S）、Cl^-（Cl）、Ca^{2+}（Ca）、Mg^{2+}（Mg）、K^+（K）、Na^+（Na）含量进行冗余分析排序。

由图 4 可知，0 ~ 20 cm 土层土壤，第一轴与有效磷、Na^+、SO_4^{2-} 和 pH 呈正相关，第二轴与 K^+、总

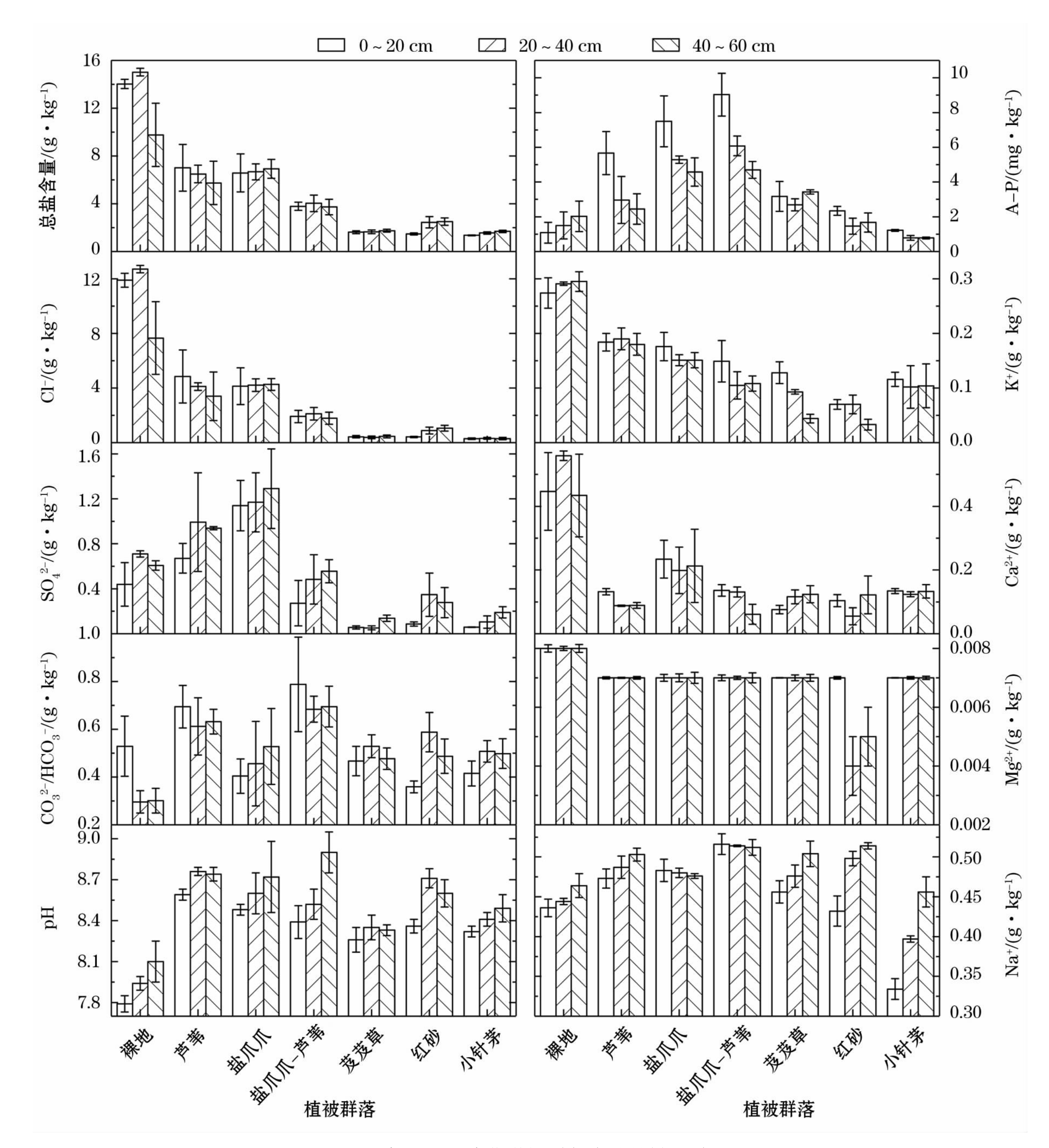


图 3　各土层土壤化学性质与自然植被的关系

Fig. 3　Relationship between soil chemical properties and natural vegetation

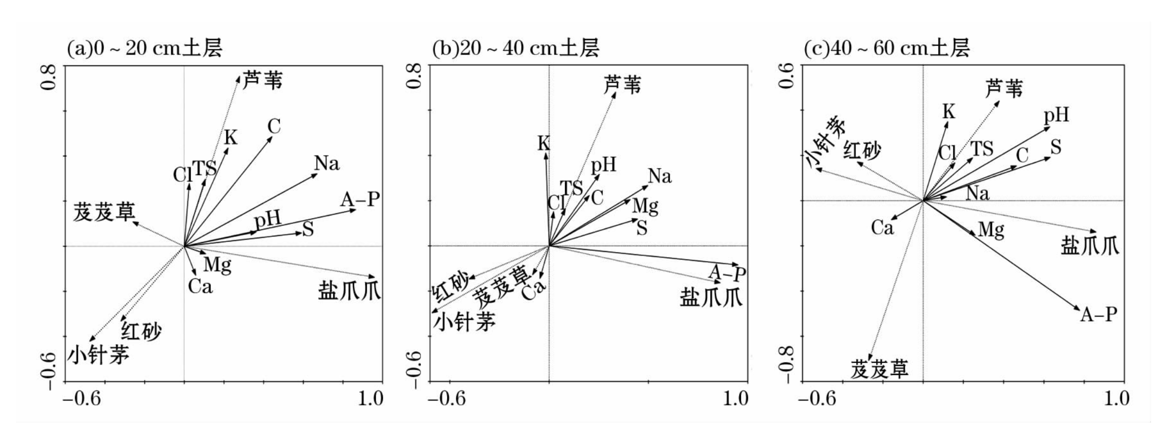
表 3　地下水及土壤主成分的因子负荷、特征值和贡献率

Tab. 3　Factor loads, eigenvalues and contribution rates of principal components of groundwater and soil

不同土层/cm	主成分	GW-L	TDS	TS	A-P	pH	特征值	贡献率/%	累积贡献率/%
0～20	1	−0.988	0.977	0.766	−0.785	0.196	3.172	63.129	63.129
	2	−0.095	0.059	0.043	0.474	0.956	1.154	23.369	86.525
20～40	1	−0.963	0.972	0.827	−0.085	0.470	2.784	54.374	54.374
	2	−0.144	0.146	0.217	0.927	0.812	1.608	33.468	87.842
40～60	1	−0.928	0.928	0.744	0.747	0.703	3.329	66.574	66.574

注：GW-L 为地下水水位；TDS 为地下水 TDS；TS 为土壤总含盐量；A-P 为土壤有效磷。

含盐量和 Cl^- 呈正相关；芦苇与 Mg^{2+} 基本无相关性，与 Ca^{2+} 呈负相关，与其余所有因子均呈正相关；盐爪爪与芨芨草受总含盐量和 Cl^- 影响较小可忽略，与其余因子与盐爪爪均呈正相关，与芨芨草呈负



注:向右为1轴正向,向上为2轴正向,实线表示土壤因子,虚线箭头表示植物物种,二者间余弦值代表其相关性,余弦值为正则表示正相关,值越大则表明相关性越大,同理为负表示负相关,为0表示无相关性,土壤因子箭头长短表示其对物种解释量的大小。

图4 物种与土壤化学性质冗余分析(RDA)

Fig. 4 RDA analysis of plant species and soil chemical properties

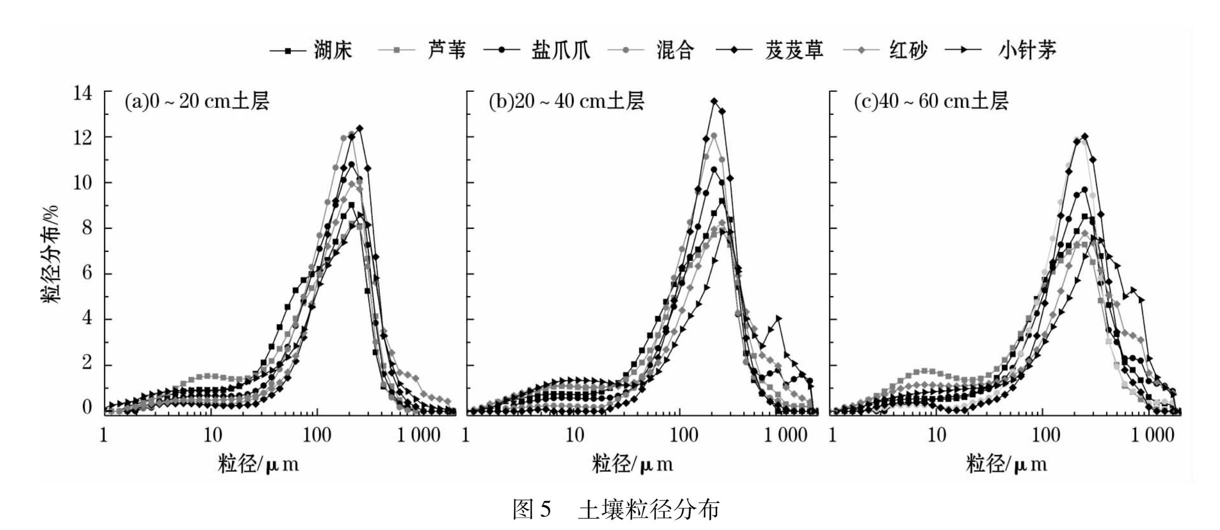


图5 土壤粒径分布

Fig. 5 Distribution of soil particle size

相关;红砂、小针茅基本不受 Ca^{2+}、Mg^{2+} 影响,与其余因子呈负相关。20～40 cm 土层土壤,第一轴与有效磷、Na^{+} 和 SO_4^{2-} 呈正相关,第二轴与 K^{+} 和 pH 呈正相关;芦苇与 Ca^{2+} 呈负相关,与其余所有土壤化学因子均呈正相关;盐爪爪与土壤化学因子相关性与0～20 cm 土层相似,芨芨草、红砂、小针茅与 Ca^{2+} 呈正相关,与其余所有土壤化学因子均呈负相关。40～60 cm 土层土壤,第一轴与有效磷、SO_4^{2-} 和 pH 呈正相关,第二轴与 K^{+} 呈正相关;芦苇、芨芨草与土壤化学因子的相关性与20～40 cm 土层相似,盐爪爪与 Ca^{2+} 呈负相关,与其余所有土壤化学因子均呈正相关;红砂、小针茅与 K^{+} 基本无相关性,与 Ca^{2+} 呈正相关,与其余土壤化学因子呈负相关。综上所述,在各层土壤各化学性质因子中,有效磷均对植被分布具有最大的影响或控制作用,其次是土壤盐离子中的 SO_4^{2-},而总含盐量、Cl^{-} 和 K^{+} 也有一定的影响。

3.4 不同植物群落土壤粒径分布

由图5可知,各层土壤成分均以砂粒为主,均高于75%且大部分高于80%,其次是粉砂,而黏土含量很小,均低于2%(粒径分级标准:砂粒 >63 μm,粉砂2～63 μm,黏土 <2 μm[26])。且各采样点各层土壤砂粒含量沿样带呈先增后减的变化趋势与植被覆盖度和生物量相似(粉砂+黏土含量变化趋势则相反),在盐爪爪、芨芨草群落中砂粒含量明显大于其他群落,其中芨芨草群落处含量最高。

4 讨 论

植被的分布、生长发育等情况与其所处环境条件息息相关,受地下水—土壤环境条件共同影

响[15,18,20],不同植物种对其所处环境条件有不同的需求与耐受力,适宜的环境条件可以满足相应植被的生长需求,植被群落随地下水－土壤环境条件的变化表现出相适应的空间格局[10,27－28]。

4.1 地下水、土壤化学对自然植被分布控制力的大小

植物生长所处的环境因素影响着其群落分布[29]。在众多环境因子中,对植被分布优先产生影响的为地下水和土壤的化学组成[10,14,30]。干旱区水源和土壤化学属性是威胁生态系统健康的两大环境问题[31]。植被与地下水有着密不可分的联系,在温带干旱气候区,存在部分或者全部依赖地下水的生态系统,在中国西北干旱地区自然降水量有限,本研究区仅为133.9 mm,不能满足植物生长的正常需求[32－33],苏培玺等[34]研究了荒漠植物正常生长发育的生理需水和生态耗水,生态耗水量为690～700 mm,节水条件下的需水量为310～340 mm,地下水成为植物的关键资源[35－36]。地下水埋深是最重要的一个生态环境指标,其他如土壤含盐量、土壤含水量、地下水TDS等可通过调节地下水埋深来进行控制[37]。地下水埋深变化是植被分布格局及群落类型变化的主要制约因子[38],在巴拉嘎斯湖,地下水埋深由内而外逐渐增加,而相应的不同地下水埋深处生长着不同的植被群落,且湖滨植被具有显著的空间异质性,表明不同植物种对地下水水位有不同的需求和适应能力。地下水与植被间有着极为密切的联系,植被群落不仅受地下水埋深制约,也受到地下水TDS的影响,地下水TDS的变化会引起植被的相应负相关变化,地下水TDS的升高会使植被覆盖度减少,较低的地下水TDS植被均有较好的长势,随着地下水TDS的提升,植被的生理活性有着明显降低[39－41]。巴拉嘎斯湖的地下水TDS由内向外呈逐渐减小趋势,因此,植被的覆盖度与生物量首先呈现出增加的趋势,群落向高等级演替,随着峰值的出现,植被的覆盖度与生物量呈现下降趋势,群落退化,这是由于地下水埋深存在阈值,最适宜的水位在4 m左右。地下水水位过深,不能满足植被需水,会威胁植被群落的正常生长[42]。

土壤是控制植物生存分布的另一关键环境因子[29]。土壤含盐量的高低直接影响植被能否正常生长发育,当土壤含盐量达到较高含量时,盐分对植被产生渗透胁迫,高浓度盐分引起高渗透压,最终可能导致植被死亡[10,43－44]。巴拉嘎斯湖湖床裸地的总含盐量(>10 g·kg^{-1})明显高于植被群落(<7 g·kg^{-1}),表明该湖自然植被在土壤总含盐量高于10 g·kg^{-1},且地下水浅、地下水TDS很高时无法生存。土壤各化学性质影响力排序,有效磷明显优先于其他。磷是植被所必需的重要元素之一,是植物体内许多重要的有机化合物的组成成分,对促进植物生长发育有着重要作用[45],且不同植被类型下土壤有效磷含量差异显著[46]。巴拉嘎斯湖泊湖滨带,有效磷含量<10 mg·kg^{-1}(图3),按第二次全国土壤普查养分分级,属于极缺乏级别,在这种极缺乏情况下,有效磷越高,植物生长越好。植被覆盖度和生物量与各层土壤有效磷均有相似的变化趋势,表明土壤的有效磷含量是土壤各化学性质中控制植被分布格局等的主要因素。当土壤含盐量能满足植被正常生存的条件,地下水与土壤有效磷含量应是人工建植工作优先考虑的因素。

4.2 自然植被对抑制粉尘排放与促进大气颗粒物沉积的作用

干涸盐湖相较于其他土地和地貌类型,具有更细致的土壤粒径,更低的临界摩擦风速,因此,干涸盐湖更易释放盐碱粉尘,成为尘源[10,47]。干盐湖湖床裸露面积大小影响着粉尘释放的潜能,而其上植被类型、植被覆盖度直接决定其裸露面积,且地表平均风速随植被高度和覆盖度的增大而减小,与盐碱粉尘释放有密切关联[48－50],同时,粉尘的沉积率也取决于湖床所生长的植被类型与植被覆盖度[51]。本研究中土壤粒径以砂粒为主,其占比由湖床至湖滨与植被群落覆盖度、生物量和株高有着高度相似的变化趋势,且均在盐爪爪群落(灌木层)与芨芨草群落(草本层)出现最大值。芨芨草的草丛,茂密的树冠可以捕获风蚀沉积物,并将其滞留,因此,土壤中砂粒含量较高[52],在大气颗粒物沉积过程中,率先沉积粒径较大的颗粒[53],表明在巴拉嘎斯湖湖滨所生长的自然植被,可阻滞风蚀颗粒进入湖床,并抑制粉尘排放的作用,芨芨草显著优于其他植被类型,盐爪爪群落也具有相似的结果;而盐爪爪群落和芨芨草群落中砂粒含量最高,一定程度上说明二者具有较优的抑制粉尘排放的能力,但是由于植被高度有所不足,对于沉积更细致的粉砂和黏土力有不逮。因此,在该区盐爪爪群落与芨芨草群落是最具抑制粉尘排放的原生自然植被群落,同时需要采取有效的恢复保护措施提升二者的植株高度。

5 结 论

巴拉嘎斯干涸盐湖其上所生长的优势物种从干涸湖床至湖滨依次是芦苇、盐爪爪、芨芨草、红砂和小针茅,呈现环状分布。对原生自然植被类型的空间分布、覆盖度和生物量等最具控制力的是地下水,当地下水埋深为 4 m 左右且 TDS 较低(< 10 g · L^{-1})时,植被群落呈现最大生物量及最大覆盖度。土壤有效磷含量对植被空间分布影响最大,有效磷含量、植被覆盖度和生物量之间在空间上呈现相似的变化趋势,盐爪爪与芨芨草分别具有灌木与草本层的最大覆盖度与生物量,是最具抑制粉尘排放作用的原生自然植被群落。当土壤含盐量能满足原生自然植被正常生长时,地下水与土壤有效磷含量应是人工恢复植被优先考虑的因素,而芨芨草与盐爪爪应是优先考虑的物种。

参考文献(References):

〔1〕 Tao S L,Fang J Y,Zhao X,et al. Rapid loss of lakes on the Mongolian Plateau〔J〕. Proceeding of the National Academy of Sciences of the United States of America,2015,112(7):2 281 –2 286.

〔2〕 汪敬忠,吴敬禄,曾海鳌,等. 内蒙古主要湖泊水资源及其变化分析〔J〕. 干旱区研究,2015,32(1):7 –14.〔Wang Jingzhong,Wu Jinglu,Zeng Hai'ao,et al. Changes of water resources of the main lakes in Inner Mongolia〔J〕. Arid Zone Research,2015,32(1):7 –14.〕

〔3〕 宋怀龙. 全球气候变化中被忽略的重大问题——盐碱(混合)尘暴〔J〕. 海洋地质与第四纪地质,2013,33(1):45 –55.〔Song Huailong. Saline-alkaline mixed dust storms:An ignored issue for global climate change〔J〕. Marine Geology & Quaternary Geology,2013,33(1):45 –55.〕

〔4〕 Gillette D,Ono D,Richmond K. A combined modelling and measurement technique for estimating windblown dust emission at Owens (dry) Lake〔J〕. Journal of Geophysical Research,2004,109(F1),doi:10.1029/2003JF000025.

〔5〕 Li H M,Qian X,Wang Q N. Heavy metals in atmospheric particulate matter:a comprehensive understanding is needed for monitoring and risk mitigation〔J〕. Environmental Science & Technology,2013,47(23):13 210 –13 211.

〔6〕 岳乐平,杨利荣,李智佩,等. 西北地区干枯湖床沉积粒度组成与东亚沙尘天气〔J〕. 沉积学报,2004,22(2):325 –331.〔Yue Leping,Yang Lirong,Li Zhipei,et al. Grain-size distribution of the sediments of dry lake-bed in the northwest of China and sand-dust weather in East Asia〔J〕. Acta Sedimentologica Sinica,2004,22(2):325 –331.〕

〔7〕 Kim D,Chin M,Bian H,et al. The effect of the dynamic surface bareness on dust source function,emission,and distribution〔J〕. Journal of Geophysical Research Atmospheres,2013,118(2):871 –886.

〔8〕 Kim D,Chin M,Remer L A,et al. Role of surface wind and vegetation cover in multi-decadal variations of dust emission in the Sahara and Sahel〔J〕. Atmospheric Environment,2017,148:282 –296.

〔9〕 Shannon S,Lunt D J. A new dust cycle model with dynamic vegetation:LPJ-dust version 1.0〔J〕. Geoscientific Model Development Discussions,2011,4(1):85 –105.

〔10〕 Zhao F J,Liu H Y,Yin Y,et al. Vegetation succession prevents dry lake beds from becoming dust sources in the semi-arid steppe region of China〔J〕. Earth Surface Processes & Landforms,2011,36(7):864 –871.

〔11〕 Liu H,Yin Y,Piao S,et al. Disappearing lakes in semiarid Northern China:drivers and environmental impact〔J〕. Environmental Science & Technology,2012,47(21):12 107 –12 114.

〔12〕 Huckelbridge K H,Stacey M T,Glenn E P,et al. An integrated model for evaluating hydrology,hydrodynamics,salinity and vegetation cover in a coastal desert wetland〔J〕. Ecological Engineering,2010,36(7):850 –861.

〔13〕 张立杰,赵文智,何志斌. 青海云杉(*Picea crassifolia*)种群格局的分形特征及其影响因素〔J〕. 生态学报,2008,28(4):1 383 –1 389.〔Zhang Lijie,Zhao Wenzhi,He Zhibin. Characteristics in *Picea crassifolia* forest fractal dimension and its influencing factors〔J〕. Acta Ecologica Sinica,2008,28(4):1 383 –1 389.〕

〔14〕 夏江宝,赵西梅,刘俊华,等. 黄河三角洲莱州湾湿地柽柳种群分布特征及其影响因素〔J〕. 生态学报,2016,36(15):4 801 –4 808.〔Xia Jiangbao,Zhao Ximei,Liu Junhua,et al. Environmental factors influencing the distribution of *Tamarix chinensis* Lour in the Laizhou Bay wetland of the Yellow River Delta〔J〕. Acta Ecologica Sinica,2016,36(15):4 801 –4 808.〕

〔15〕 Fan X M,Pedroli B,Liu G H,et al. Potential plant species distribution in the Yellow River Delta under the influence of groundwater level and soil salinity〔J〕. Ecohydrology,2011,4(6):744 –756.

〔16〕 Piniewski M,Gottschalk L,Krasovskaia I,et al. A GIS-based model for testing effects of restoration measures in wetlands:A case study in the Kampinos National Park,Poland〔J〕. Ecological Engineering,2012,44(4):25 –35.

〔17〕 Sun L Z,Liu T. Response of *Haloxylon ammodendron* (C. A. MEY) to underground water quality,depth and soil salt deposition in Gurbantonggut Desert,West China〔J〕. Pakistan Journal of Botany,2016,48(2):485 –494.

〔18〕 Zhang X L,Guan T Y,Zhou J H,et al. Groundwater depth and soil properties are associated with variation in vegetation of a desert riparian ecosystem in an arid area of China〔J〕. Forests,2018,9(1):34.

〔19〕 Kobryn H T,Lantzke R,Bell R,et al. Remote sensing for assessing the zone of benefit where deep drains improve productivity of land affected by shallow saline groundwater〔J〕. Journal of Environmental Management,2015,150:138 –148.

〔20〕 马玉蕾,王德,刘俊民,等. 黄河三角洲典型植被与地下水埋深和土壤盐分的关系〔J〕. 应用生态学报,2013,24(9):2 423 –2 430.〔Ma Yulei,Wang De,Liu Junmin,et al. Relationships between typical vegetations,soil salinity,and groundwater depth in the Yellow River Delta of China〔J〕. Chinese Journal of Applied

Ecology,2013,24(9):2 423 - 2 430.〕

〔21〕郝清华. 吉兰泰盐湖周边地区不同植被恢复方式效果研究〔D〕. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2011.〔Hao Qinghua. Research the Effect of Different Vegetation Restoration Way for Surrounding Jilantai Salt Lake area〔D〕. Hohhot :Inner Mongolia Agricultural University,2011.〕

〔22〕张莹莹. 运城盐湖盐角草的生物学特征及其影响因子〔D〕. 太原:山西师范大学,2012.〔Zhang Yingying. Study on Biological Characteristics and the Affecting Factors of Salicornia of Yuncheng Salt Lake〔D〕. Taiyuan:Shanxi Normal University,2012.〕

〔23〕杨昊天,李新荣,王增如,等. 腾格里沙漠东南缘 4 种灌木的生物量预测模型〔J〕. 中国沙漠,2013,33(6):1 699 - 1 704.〔Yang Haotian,Li Xinrong,Wang Zengru,et al. Biomass estimation models of four shrub species at southeastern edge of the Tengger Desert〔J〕. Acta Ecologica Sinica,2013,33(6):1 699 - 1 704.〕

〔24〕杜森,高祥照. 土壤分析技术规范〔M〕. 第二版. 北京:中国农业出版社,2006.〔Du Sen,Gao Xiangzhao. Technical Specification for Soil Analysis〔M〕. Second Edition. Beijing:China Agricul Ture Press,2006.〕

〔25〕杨春霞,李彩虹,赵银宝. 离子色谱法测定土壤中无机阴阳离子含量〔J〕. 理化检验(化学分册),2012,48(10):1 199 - 1 202.〔Yang Chunxia,Li Caihong,Zhao Yinbao. IC determination of inorganic anions and cations in soil〔J〕. Physical Testing and Chemical Analysis(Part B:Chemical Analysis),2012,48(10):1 199 - 1 202.〕

〔26〕Friedman G M,Sanders J E. Principles of Sedimentology〔M〕. New York:Wiley,1978.

〔27〕安乐生,赵全升,叶思源,等. 黄河三角洲地下水关键水盐因子及其植被效应〔J〕. 水科学进展,2011,22(5):689 - 895.〔An Lesheng,Zhao Quansheng,Ye Siyuan,et al. Water-salt interactions factors and vegetation effects in the groundwater ecosystem in Yellow River Delta〔J〕. Advances in Water Science,2011,22(5):689 - 895.〕

〔28〕刘淑娟,刘世增,袁宏波,等. 青土湖水面形成过程中荒漠植物群落结构的变化〔J〕. 干旱区研究,2017,34(1):72 - 78.〔Liu Shujuan,Liu Shizeng,Yuan Hongbo,et al. Change of structure of desert plant communities during water area formation of the Qingtu Lake〔J〕. Arid Zone Research,2017,34(1):72 - 78.〕

〔29〕Tian Z P,Wang X L,Zhao X Y,et al. A unique mountainous vertical distribution patterns and related environmental interpretation:A case study on the northern slope of the Ili River Valley〔J〕. Pakistan Journal of Botany,2016,48(5):1 877 - 1 886.

〔30〕Zhou J L,Wu Y,Kang Q S,et al. Spatial variations of carbon,nitrogen,phosphorous and sulfur in the salt marsh sediments of the Yangtze Estuary in China〔J〕. Estuarine Coastal & Shelf Science,2007,71(1 - 2):47 - 59.

〔31〕Jolly I D,Mcewan K L,Holland K L. A review of groundwater –surface water interactions in arid/semi-arid wetlands and the consequences of salinity for wetland ecology〔J〕. Ecohydrology,2010,1(1):43 - 58.

〔32〕赵文智,刘鹄. 荒漠区植被对地下水埋深响应研究进展〔J〕. 生态学报,2006,26(8):2 702 - 2 708.〔Zhao Wenzhi,Liu Hu. Recent advances in desert vegetation response to groundwater table changes〔J〕. Acta Ecologica Sinica,2006,26(8):2 702 - 2 708.〕

〔33〕Li H J,Yi J,Zhang J G,et al. Modeling of soil water and salt dynamics and its effects on root water uptake in Heihe Arid Wetland,Gansu,China〔J〕. Water,2015,7(5):2 382 - 2 401.

〔34〕苏培玺,周紫鹃,张海娜,等. 荒漠植物生理需水量及耗水规律研究〔C〕//中国植物学会. 中国植物学会八十周年年会论文集. 南昌:中国植物学会,2013:168 - 169.〔Su Peixi,Zhou Zijuan,Zhang Hai'na,et al. Study on the physiological water demand and water consumption of desert plants〔C〕// Botanical Society of China. The 80th Anniversary Year Conference of Botanical Society of China. Nanchang: Botanical Society of China, 2013: 168 - 169.〕

〔35〕Guo Z R,Liu H T. Eco-depth of groundwater table for natural vegetation in inland basin,Northwestern China〔J〕. Journal of Arid Land Resources & Environment,2005,19(3):157 - 161.

〔36〕樊自立,陈亚宁,李和平,等. 中国西北干旱区生态地下水埋深适宜深度的确定〔J〕. 干旱区资源与环境,2008,22(2):1 - 5.〔Fan Zili,Chen Yaning,Li Heping,et al. Determination of suitable ecological groundwater depth in arid areas in Northwest part of China〔J〕. Journal of Arid Land Resources & Environment,2008,22(2):1 - 5.〕

〔37〕田云云. 海河流域地下水与地表生态相互作用研究〔D〕. 天津:天津大学,2013.〔Tian Yunyun. Interaction of Groundwater and Surface Ecological in Haihe River Basin〔D〕. Tianjin:Tianjin University,2013.〕

〔38〕朱军涛,于静洁,王平,等. 额济纳荒漠绿洲植物群落的数量分类及其与地下水环境的关系分析〔J〕. 植物生态学报,2011,35(5):480 - 489.〔Zhu Juntao,Yu Jingjie,Wang Ping,et al. Quantitative classification and analysis of relationships between plant communities and their groundwater enbironment in the Ejin Desert Oasis of China〔J〕. Chinese Journal of Plant Ecology,2011,35(5):480 - 489.〕

〔39〕Comte J C,Join J L,Banton O,et al. Modelling the response of fresh groundwater to climate and vegetation changes in coral islands〔J〕. Hydrogeology Journal,2014,22(8):1 905 - 1 920.

〔40〕Barbarella M,De G M,Greggio N. Effects of saltwater intrusion on pinewood vegetation using satellite ASTER data:The case study of Ravenna(Italy)〔J〕. Environmental Monitoring & Assessment,2015,187(4):4 375.

〔41〕张晓,魏青军,刘亮. 吐鲁番盆地地下水与植被的关系研究〔J〕. 山东国土资源,2016,32(7):42 - 48.〔Zhang Xiao,Wei Qingjun,Liu Liang. Research on relation between groundwater and vegetation in Turpan Basin〔J〕. Land and Resources in Shangdong Province,2016,32(7):42 - 48.〕

〔42〕Krogulec E,Zabłocki S,Sawicka K. Changes in groundwater regime during vegetation period in Groundwater Dependent Ecosystems〔J〕. Acta Geologica Polonica,2016,66(3):527 - 542.

〔43〕何文义,于涛,蔡玉梅. 盐碱地的治理与利用〔J〕. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2010,29(增刊 1):158 - 160.〔He Wenyi,Yu Tao,Cai Yumei. Analysis of control and use of alkaline soil〔J〕. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science Edition),2010,29(Suppl. 1):158 - 160.〕

〔44〕王雷,姜黎,田长彦. 盐分对异子蓬异型种子植株生长和矿质营养的影响〔J〕. 干旱区研究,2018,35(3):510 - 514.〔Wang

Lei, Jiang Li, Tian Changyan. Effects of NaCl on the growth and mineral nutrient content of plants grown from dimorphic seeds of *Suaeda aralocaspica*[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(3): 510 – 514.]

[45] 范曾丽,王三根. 缺磷胁迫对不同玉米幼苗生长的影响[J]. 中国农学通报,2007,23(3):231 – 235. [Fan Zengli, Wang Sangen. Effect of phosphorus deficiency stress on growth of different maize seeding[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2007, 23(3): 231 – 235.]

[46] 王恒威,许明祥,王爱国,等. 黄土丘陵区土壤磷有效性与植物适应性研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2012,40(7):149 – 155. [Wang Hengwei, Xu Mingxiang, Wang Aiguo, et al. Study on availability of soil phosphotus and plants adaptability in the Loess Hilly Regiob[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2012, 40(7): 149 – 155.]

[47] 刘艳菊,韩同林,庞健峰,等. 北京地区盐碱尘暴粉尘物质的主要来源[J]. 地质通报,2010,29(5):713 – 722. [Liu Yanju, Han Tonglin, Pang Jianfeng, et al. Origin of the salt dust storm, Beijing, China[J]. Geological Bulletin of China, 2010, 29(5): 713 – 722.]

[48] Okin G S, Gillette D A. Distribution of vegetation in wind-dominated landscapes: Implications for wind erosion modeling and landscape processes [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2001, 106(D9): 9 673 – 9 683.

[49] Munson S M, Belnap J, Okin G S. Responses of wind erosion to climate-induced vegetation changes on the Colorado Plateau[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2011, 108(10): 3 854 – 3 859.

[50] 徐满厚,刘彤. 绿洲 – 荒漠过渡带早春自然植被的物种组成及其防风效应[J]. 干旱区研究,2012,29(1):64 – 72. [Xu Manhou, Liu Tong. Species composition and wind proof effect of natural vegetation at an oasis-desert ecotone in early spring[J]. Arid Zone Research, 2012, 29(1): 64 – 72.]

[51] Negral L, Moreno-Grau S, Moreno J, et al. Natural and anthropogenic contributions to PM_{10} and $PM_{2.5}$ in an urban area in the western Mediterranean Coast [J]. Water Air & Soil Pollution, 2008, 192(1 – 4): 227 – 238.

[52] Huai H, Wei W, Zhang Y. Characteristics of the Achnatherum splendens community along the Qinghai-Tibet Railway, China[J]. Frontiers of Biology in China, 2008, 3(4): 477 – 483.

[53] 刘东伟,吉力力·阿不都外力,王立新. 新疆艾比湖地区盐尘的沉积通量及其物质组成[J]. 冰川冻土,2014,36(2):352 – 359. [Liu Dongwei, Jilili Abuduwaili, Wang Lixin. Sediment fluxes and material composition of the salt dust in Ebinur Lake region, Xinjiang[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(2): 352 – 359.]

Effects of Groundwater and Soil Chemical Properties on Distribution of Natural Vegetation around Playa

CHENG Guo-shuai, LIU Dong-wei, WEN Lu, LIU Hua-min, DONG Shao-gang, WANG Li-xin

(*School of Ecology and Environment, Inner Mongolia University, Hohhot* 010021, *Inner Mongolia, China*)

Abstract: Lakes in northwest China are dramatically shrunk and even dried up. Large areas of exposed lake beds become as the sources of chemical dust. Promoting vegetation coverage is an effective way in suppressing dust emissions and regenerating ecosystem. In this study, the Balhages playa, typical in the northern marginal zone of Inner Mongolia, was selected to examine the effects of groundwater and soil chemical properties on the spatial distribution of natural vegetation based on the field survey, transect investigation, field sampling and laboratory analysis as well as statistical analysis. The results showed that, under the influence of groundwater and soil chemical properties, the communities of *Phragmites australis*, *Kalidium foliatum*, *Achnatherum splendens*, *Reaumuria songarica* and *Stipa klemenzii* were distributed in a ring shape from the dried lake-bed to the lakeside. The spatial distribution of natural vegetation around the playa was mainly affected by groundwater level, total dissolved solids (TDS) and soil available phosphorus content. The groundwater depth increased gradually but the groundwater TDS decreased from the lake bed to the lakeside. The biomass and coverage of the vegetation was maximal when the groundwater depth was about 4 m and the TDS was lower than 10 g · L^{-1}. The effect of soil available phosphorus content on the spatial distribution of natural vegetation was the highest, and then that of soil SO_4^{2-}. When soil salt content is feasible for the survival of native natural vegetation, groundwater and soil available phosphorus content should be preferentially considered for artificial vegetation regeneration over playa.

Key words: playa; dried lake-bed; groundwater; desert vegetation; soil chemical property; Inner Mongolia